Gérer le manque d'eau en agriculture

D'après les derniers scénarios climatiques, les sécheresses seront plus fréquentes à l'avenir. L'Inra mène donc de nombreuses recherches visant à offrir aux agriculteurs les moyens de gérer ce risque.

A court terme, il s'agit d'anticiper au mieux l'épisode de sécheresse, d'en caractériser l'ampleur et d'optimiser les systèmes de cultures existants. A plus long terme, ces derniers devront être repensés pour conjuguer résistance au manque d'eau et compétitivité. L'Inra s'investit également au-delà de la question agricole. En effet, l'Institut participe aux efforts de l'ensemble des acteurs concernés par une meilleure gestion territoriale de l'eau entre ses différents usages.





© Inra / Marc Benoît

1 Sécheresse 2011, l'hiver du décor

Les premiers mois de l'année, peu arrosés, ont créé une sécheresse atypique en France. Très préoccupant sans être gravissime, cet épisode climatique se reproduira sans doute à l'avenir… sans que l'on sache prévoir précisément quand !

Après avoir fait la Une des médias pendant tout le mois de mai, la gravité de la sécheresse a été remise en question dès les premières pluies. Pourtant, ce n'est pas parce qu'il a plu en juin et juillet que les conséquences de la sécheresse installée au cours des mois précédents ont été résorbées ! En effet, pour la plupart des productions végétales, le rendement et la qualité s'élaborent très tôt au printemps et une absence d'eau à cette période entraîne inévitablement une baisse de production. De plus, les pluies d'été sont captées en premier lieu par la végétation, dont la demande en eau est très forte à cette période, avant de pouvoir reconstituer les réserves des sols et *a fortiori* celles des nappes souterraines. Plus généralement, comment qualifier et quantifier la gravité de cet épisode de sécheresse, et comment le positionner dans le contexte de l'évolution globale du climat ?

Hiver et printemps secs… du jamais vu depuis 50 ans

Comme cela s'était déjà produit lors d'autres épisodes historiques récents (1976, 1997, 2003 et 2005), l'anticyclone des Açores s'est déplacé au début du printemps de 500 km environ vers le Nord pour s'installer durablement sur l'Europe occidentale, son influence s'étendant jusqu'à la Pologne, voire l'Ukraine. Résultat : une quantité de pluie très faible de mars à mai. Ce printemps très sec a fait suite à un hiver peu arrosé (-40 à 60% de pluies cumulées de janvier à mai par rapport à la moyenne sur la période 1965-2010) qui n'a pas permis aux nappes souterraines de se recharger, à l'exception des régions méditerranéennes où les pluies hivernales ont été excédentaires. C'est donc la continuité de la sécheresse entre l'hiver et le printemps qui a conduit à cette situation exceptionnelle. Dans les épisodes précédents, nous avions bénéficié soit d'une période de recharge des nappes satisfaisante en hiver (2003), soit d'épisodes pluvieux au printemps (1997, 2005). En 1976, le printemps avait été moins sec et le niveau de sécheresse des sols n'avait pas atteint celui de 2011 à la mi-avril, record historique depuis 50 ans.

Un impact variable selon les cultures et selon les régions

Comme lors de chaque sécheresse majeure, l'élevage est le secteur le plus touché. En effet, la sécheresse printanière a affecté en premier lieu la production de fourrages dans les prairies permanentes comme dans les prairies

temporaires (fétuque, ray-grass), ainsi que les cultures de céréales destinées à l'alimentation animale (avoine, orge, triticale). Les productions de biomasse sur les coupes de printemps affichent des baisses de près de 50% dans le Centre-Ouest. Mais les pluies de juillet ont été très bénéfiques pour la production de l'automne.
Les cultures de printemps, et en particulier le maïs et le tournesol, ont été moins touchées. Grâce au retour des pluies en juin, seules les cultures en sol peu profond ont montré des signes de stress hydrique.

Focus sur les prairies permanentes

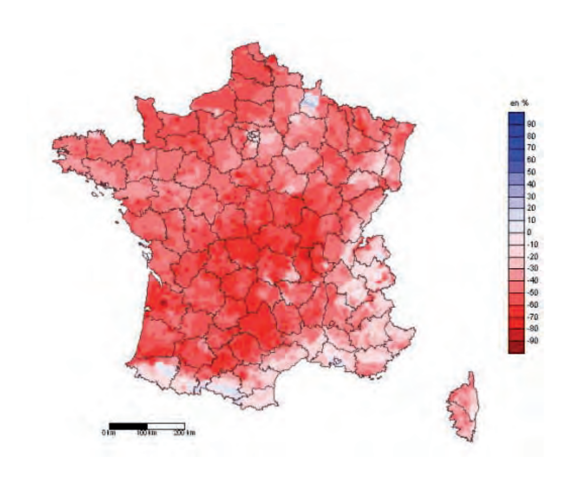
Si les prairies temporaires peuvent être réensemencées, les prairies permanentes peuvent mettre plusieurs années à retrouver leur équilibre suite à une sécheresse grave. Des travaux conduits à l'Inra, en parcelles expérimentales, montrent que certaines espèces peuvent fortement régresser (graminées, légumineuses), tandis que des espèces adventices tels les chardons ou l'oseille peuvent envahir les « trous » laissés libres par la disparition des végétations prairiales. Pour Pascal Carrère (1) « *Une prairie permanente doit bénéficier d'autant d'attention qu'une culture. Bien gérée et entretenue, elle est à même de résister à des stress importants et la diversité végétale qu'elle abrite lui permet une bonne régénération une fois l'épisode de sécheresse passé. Il faut raisonner à la fois la composition de la flore, la charge des animaux, la fertilisation et l'alternance pâturage/fauche* ». En curatif, sur les parcelles mécanisables, on peut pratiquer des « sursemis » après un travail superficiel du sol, pour réimplanter les espèces dominantes d'origine. Les travaux conduits actuellement sur les prairies à l'Inra sont synthétisés sous forme de typologies, qui fournissent aux exploitants, *via* les conseillers agricoles, des informations complètes sur la composition floristique, les valeurs agricoles et environnementales et les services que l'on peut en attendre. Ces typologies sont des éléments précieux de discussion avec les éleveurs pour adapter leurs pratiques au potentiel de production de leurs prairies (2).

Focus dans le Sud-Ouest

Certaines régions françaises ont été plus touchées par la sécheresse : le Sud-Ouest (Aquitaine, Poitou-Charentes), le Centre et le Nord-Est (Franche-Comté, Alsace). Cette année, il a moins plu à Bordeaux qu'à Avignon. Cette tendance à la sécheresse dans le Sud-Ouest s'ajoute à des caractéristiques défavorables : peu de rivières à gros débit et pas de nappes souterraines permettant le stockage de l'eau. Paradoxalement, le Sud-Est, qui possède un climat méditerranéen théoriquement plus sec, bénéficie de fortes ressources fluviales favorables à l'irrigation, avec le Rhône et la Durance, qui sont alimentés par la fonte des neiges des Alpes.

Prévisible ? Non, pas plusieurs mois à l'avance

Les modèles météorologiques actuels ne permettent pas de prédire les variations de climat d'une année sur l'autre : en effet, le climat européen est soumis à de multiples influences, ce qui rend difficile les prévisions de la température et de la pluviométrie plusieurs mois à l'avance.
Par contre, on peut dégager les tendances du climat à long terme : une augmentation de la température moyenne et une baisse quasi-générale de la pluviométrie estivale (source : météo France). Les scénarios du GIEC (3) prévoient une augmentation de la température moyenne de 2 à 4°C d'ici la fin du siècle et un déficit pluviométrique au printemps et en été plus fort à l'Ouest qu'à l'Est.



CARTE DE L'INDICE D'HUMIDITÉ des sols en écart/moyenne 1971-2000 (source : météo France au 1er juillet 2011).
En juillet, la sécheresse des sols superficiels demeure critique, avec des déficits parmi les plus élevés depuis 50 ans sur le Poitou-Charentes, le Centre, le Limousin, l'Aquitaine, le Tarn et l'Aveyron.

Un risque à intégrer dans les pratiques

En résumé, les sécheresses, aggravées par des vagues de chaleur, risquent d'être plus fréquentes à l'avenir, mais resteront difficiles à prévoir et donc à anticiper. Il convient de les considérer comme un risque structurel à intégrer dans les pratiques, comme le souligne le rapport de l'expertise scientifique collective « Sécheresse et Agriculture » paru en 2006 (4). La prévention reste le meilleur moyen d'affronter un aléa et c'est dans ce sens que se développent les recherches de l'Inra, en partenariat avec le développement agricole.



PRAIRIE NATURELLE de montagne d'Auvergne.

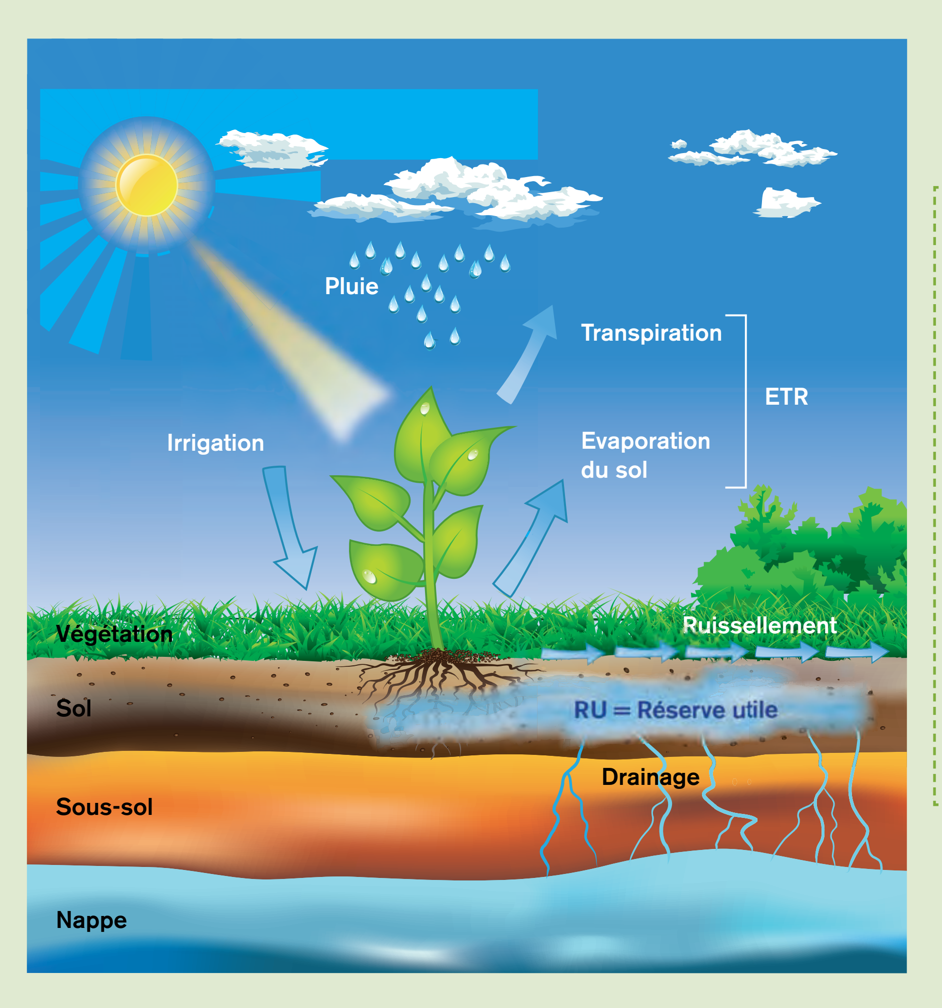
(1) Directeur de l'Unité de recherche sur l'écosystème prairial, à l'Inra de Clermont-Ferrand.
(2) www.prairies.aop.net
(3) Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.
(4) Expertise réalisée par l'Inra à la demande du ministère de l'Agriculture et de la Pêche. www.inra.fr/l_institut/expertise/expertises_realisees/secheresse_et_agriculture_rapport_d_expertise).

DOSSIER

Comment quantifier la gravité d'une sécheresse et ses conséquences sur l'agriculture ? Les apports de la recherche

La question centrale pour l'agriculture est d'anticiper les conséquences des sécheresses sur le rendement des cultures. Question complexe, mais de fort enjeu économique, pour laquelle la recherche déploie un éventail de méthodes complémentaires.

A LA BASE, LE SUIVI DU BILAN HYDRIQUE DES CULTURES



Cycle de l'eau au niveau de la plante

La quantité d'eau disponible pour la plante à un instant donné **R** est égale à RU + (pluies + irrigation-ruissellement-drainage) – ETR.

RU : réserve utile qui dépend, pour une culture donnée, de la hauteur du sol et de la profondeur des racines.

ETR : évapotranspiration : somme de l'évaporation du sol et de la consommation d'eau par la plante, qui rejette dans l'atmosphère, par les pores de ses feuilles (i.e. les stomates), la quasi-totalité de l'eau qu'elle absorbe.

Du point de vue agricole, la gravité d'une sécheresse se définit par le déficit des réserves en eau des sols superficiels. Une des manières de l'exprimer est le rapport R/RU, soit, pour prendre une image, le niveau du réservoir à un instant donné rapporté à la contenance du réservoir. On estime que la plante couvre ses besoins en eau de façon optimale s'il reste dans le sol au moins la moitié du réservoir (R>RU/2). En deçà, la plante ferme ses stomates* et son évapotranspiration (ETR) n'est pas optimale. L'ETR ne peut être mesurée exactement qu'à l'aide d'appareils utilisés en recherche. Sur le terrain, l'agriculteur peut l'estimer à partir des données météorologiques, des caractéristiques du sol et de celles du cycle de végétation de chaque culture. Certains logiciels, comme IRRINOV®**, permettent aux agriculteurs de calculer la quantité d'eau à apporter par irrigation pour que l'ETR soit optimale.

* Pores, situés sur la membrane des cellules foliaires, qui régulent les échanges d'eau et de gaz (CO_2, O_2).

** IRRINOV® est une méthode de conduite de l'irrigation, mise au point par ARVALIS-Institut du végétal et un réseau de partenaires nationaux et régionaux.

L'INFLUENCE DU CLIMAT : LA VEILLE AGROCLIMATIQUE

L'état hydrique du sol (R/RU) est l'un des douze paramètres de sortie du dispositif VAC (Veille AgroClimatique) développé par l'Inra à la suite de la canicule de 2003 pour analyser l'influence du climat sur la production agricole. Ce dispositif calcule les caractéristiques de la production (rendement, qualité, durée du cycle, indices de stress hydrique, de stress azoté, etc.) en fonction des données météorologiques (températures minimales et maximales, pluies, rayonnement, humidité, vent) réellement enregistrées sur dix sites expérimentaux de l'Inra couvrant la diversité climatique de la France. Il repose sur un modèle de développement des plantes (STICS) et fonctionne pour sept types de culture (dont blé, colza, maïs, tournesol). Il considère un système théorique simplifié dans lequel seul le climat varie, avec deux composantes fixées arbitrairement et communes à tous les sites : un sol médian et un itinéraire technique unique, mais représentatif. Il ne permet donc pas de calculer un rendement réel, mais un rendement « climatique » qui ne prend en compte que l'influence du climat.


© Inra / Chrstophe Maître

CHAMP DE COLZA.

LA PRÉVISION DES RENDEMENTS : LE SYSTÈME MARS


© Inra / Jean Weber

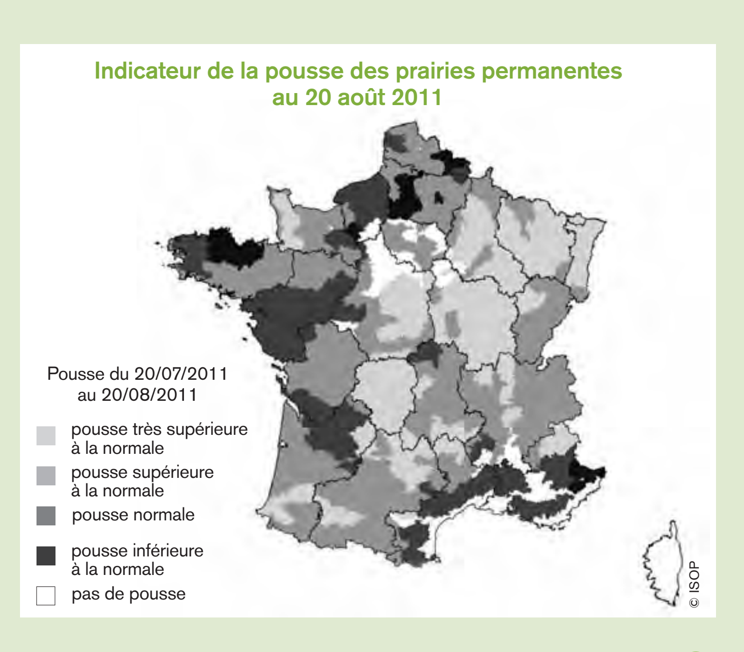
PARCELLE DE POMMES DE TERRE en Picardie.

A l'échelle européenne, un autre outil complémentaire* donne une anticipation des rendements réels, mais à un grain géographique moins fin. Cet outil, appelé MARS (Monitoring Agricultural ResourceS) calcule les variables météorologiques (cumul des températures, cumul des pluies, etc.) sur des zones de 25x25 km et fait des estimations mois par mois sur le rendement à venir de différentes cultures (blé d'hiver, orge, maïs, pomme de terre, etc.), en utilisant des itinéraires techniques identifiés pour chaque zone et une cartographie du sol. Il a anticipé par exemple une baisse de production de blé tendre en France de -11,5% pour 2011 par rapport à 2010. Résultat corroboré par le service de la statistique et de la prospective du ministère de l'Agriculture (-10%).

* Développé par le Centre de recherche de la Commission européenne basé à Ispra en Italie.

PRAIRIES : LE SYSTÈME ISOP

Le modèle STICS a fait l'objet de développements spécifiques pour estimer le rendement des prairies, qui, contrairement aux grandes cultures, sont en partie consommées par les animaux. Ce système, appelé ISOP (Information et Suivi Objectif des Prairies), fruit d'une collaboration entre Météo-France, l'Inra et le ministère en charge de l'agriculture (service de la statistique et de la prospective) permet à ce dernier d'obtenir une image objective des dommages. Il calcule la quantité de matière sèche par hectare, jour après jour, à l'échelle de petites régions fourragères considérées comme homogènes pour les sols et les pratiques.




© Inra / Jean Weber

2 Les leviers à court terme

Face à des sécheresses ponctuelles, les agriculteurs disposent d'une panoplie de réactions à court terme dont la mise en œuvre dépend de leur appréciation, voire de leur anticipation de la situation. Cependant, la fréquence accrue des sécheresses les amène à envisager des changements plus profonds de leurs systèmes de culture et d'élevage, vers une plus grande diversification et une plus grande souplesse pour s'adapter aux aléas du climat.

« *Il ne s'agit plus de savoir si l'agriculture va devoir s'adapter à des conditions climatiques différentes de celles que nous connaissons, mais bien comment elle va pouvoir le faire* ». Telle était en 2006 l'une des conclusions de l'expertise collective « Sécheresse et Agriculture » menée par l'Inra à la demande des ministères de l'Agriculture et de l'Environnement à la suite des épisodes de sécheresse successifs de 2003, 2004 et 2005. Cette expertise, qui a mobilisé plus de trente experts, a fait le point sur les connaissances les plus récentes sur la sécheresse et sur les moyens de réduire la vulnérabilité de l'agriculture face au manque d'eau. Il apparaît qu'au niveau individuel, les agriculteurs disposent de deux grands types de leviers : à court terme, intra-annuel, pour pallier une sécheresse ponctuelle, et à long terme, pour concevoir des systèmes de culture intrinsèquement plus résistants. Ces derniers font largement appel à la recherche (voir en partie 3).

Le gain de l'anticipation

Pour ce qui est des leviers à court terme, leur efficacité dépend fortement de la possibilité d'anticiper la sécheresse le plus tôt possible dans l'année. Une étude de l'Inra l'a montré pour le levier irrigation, dans le cas d' un agriculteur « représentatif » du Sud-Ouest, qui répartit sa surface cultivée entre trois systèmes : monoculture de maïs, rotation blé dur/sorgho, rotation blé dur/tournesol. Les pertes de profit de l'agriculteur peuvent atteindre 54% s'il ne peut pas anticiper les interdictions d'irrigation en période d'étiage (lorsque le niveau des rivières est au plus bas) lors des années sèches. Alors que si l'information est connue avant mi-juillet, il peut ré-optimiser ses tactiques d'irrigation et la perte peut rester inférieure à 15%. La même étude montre que les décisions de plus long terme de l'agriculteur (réallocation de ses surfaces entre les trois systèmes) atténuent considérablement la perte résultant des interdictions d'irrigation, qu'elle soit ou non anticipée (-1,8%). Mais l'anticipation n'est pas toujours possible. Cette année, la situation de sécheresse n'a été vraiment constatée qu'au mois de mai, comme en témoigne Frédéric Levrault, de la chambre d'agriculture de Poitou-Charentes, une région particulièrement touchée (1). Selon cet observateur privilégié, « *même si la recharge des aquifères avait diminué en mars, on espérait des pluies en avril. Le vrai constat n'est venu qu'en avril-mai* ». Même témoignage côté élevage, de la part de Pascale Pelletier, ingénieur régional Fourrages à ARVALIS-Institut du Végétal dans la région voisine (2) : « *A Pâques, la pousse d'herbe était correcte, le déficit hydrique n'a été évident que fin avril-début mai. Ce qui a surpris ensuite, c'est l'ampleur de la sécheresse, ajoutée aux fortes températures : fin avril, il y avait trois semaines d'avance en degrés cumulés* ».

Elevage : aliments diversifiés et stocks

Du côté de l'élevage, « *les éleveurs complémentent depuis la fin mai, il y a un énorme manque de fourrage*, poursuit Pascale Pelletier. *En Indre et dans le Cher, les pailles (orge, blé) ont été réquisitionnées pour compléter la nourriture des animaux, il est interdit de les broyer pour les restituer au sol* ». Autre solution : l'implantation de cultures dérobées sur les terres libérées précocement par les cultures d'hiver, récoltées avec deux à trois semaines d'avance. Les

espèces semées sont des graminées fourragères à croissance rapide (ray-grass d'Italie, millet perlé…). Ces cultures ont bénéficié, par chance, des pluies de juin et juillet. Troisième solution, l'ensilage de céréales immatures dès fin mai.
A un degré d'anticipation supérieur, l'utilisation d'espèces fourragères moins sensibles à la sécheresse comme la luzerne peut limiter les dommages. De même que la constitution de stocks d'herbe. L'Inra de Toulouse (3) a développé un logiciel, Herb'âge, qui permet d'optimiser la récolte d'herbe dans les prairies permanentes en calculant le stade de maturité de la végétation en fonction de la somme des températures écoulées depuis la dernière coupe. Certaines chambres d'agriculture utilisent cet outil pour donner des conseils sur la date de fauche *via* les bulletins des réseaux d'avertissements « Gestion de l'herbe ». Par exemple, ce bulletin du 23 mai 2011, diffusé par la chambre d'agriculture de la Creuse qui indique que « *le cumul des 1 000°C étant dépassé, toutes les graminées sont au stade épiaison et qu'il faut faucher sans attendre* ». L'équipe de l'Inra de Toulouse développe parallèlement des modèles de recherche plus complexes visant à concevoir les systèmes les moins risqués par rapport à la variabilité du climat et à son évolution à long terme.



LES PÂTURAGES sont des milieux très diversifiés où la consommation d'herbe dépend toujours des mêmes facteurs : conduite de l'éleveur, type de prairie, caractéristiques des animaux et aliments complémentaires (fourrages, concentrés, minéraux…).

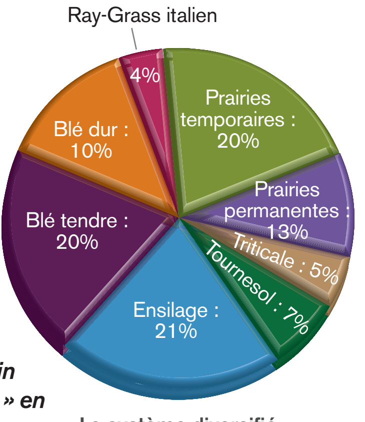
L'expertise collective souligne la fragilité des systèmes d'élevage, l'éleveur devant assurer chaque année une ration relativement incompressible pour nourrir ses animaux alors que la quantité de fourrages peut varier de

Deux exemples de systèmes d'élevage autosuffisants en fourrages

• Du maïs à la combinaison céréales/prairie

Thierry Morineau* possède 63 vaches laitières et 50 génisses et 102 ha dans les Deux-Sèvres (charge : 1,2 UGB/ha) en système élevage/polyculture.

« Alors que la plupart de mes voisins nourrissent leurs animaux avec du maïs irrigué, j'ai peu à peu remplacé mes surfaces en maïs par des prairies, explique Thierry Morineau. Car, pendant plusieurs années de sécheresse consécutives, le maïs a peu donné et je ne voulais pas investir dans un système d'irrigation. J'ai commencé en 2002 avec 5 ha de prairies (trèfle blanc et ray-grass-anglais). J'y ai ajouté 28 ha après la canicule de 2003 pour augmenter le temps de pâturage. Maintenant, dès la fin mars, les vaches sont dehors toute la journée, et jour et nuit à partir de mi-avril. Elles tournent quatre à six jours par parcelle : quand l'herbe est descendue jusqu'au talon de ma botte, je les change de parcelle pour ne pas épuiser la végétation. Cette année, les vaches ont consommé au printemps le maïs ensilé et le silo d'herbe mis en réserve l'année d'avant, que j'ai complété avec du triticale ensilé en grain immature. Mais elles ont pu aussi pâturer pendant la journée sur la luzerne qui est « repartie » en juin et sur le festulolium**, en attendant les récoltes de sorgho et de maïs ».



Le système diversifié de Thierry Morineau

* Thierry Morineau a participé à la « première journée technique régionale prairies et variétés fourragères », co-organisée par l'Inra et les chambres d'agriculture du Poitou-Charentes, le 14 juin à Lusignan en plein contexte de sécheresse.

** Le festulolium est issu d'un croisement entre le ray-grass et la fétuque. Des travaux conduits à l'Inra de Lusignan dans les années 80 ont montré que l'utilisation d'une espèce ancestrale de fétuque dans les croisements apporte des qualités de digestibilité et de pérennité particulièrement intéressantes.

• Le paquet sur les stocks

Un système herbager biologique est en place à la ferme expérimentale Inra de Redon, vers Clermont-Ferrand, 800 m d'altitude, avec 120 brebis allaitantes sur 24 ha dont 10 de prairies temporaires (charge : 0,85 UGB/ha).

« En système biologique, nous sommes obligés de tendre vers une autosuffisance pour l'alimentation, indique Marc Benoit* car les aliments concentrés coûtent très cher. Notre système a été conçu en 2000 par modélisation** et nous l'avons adapté en 2005. Les principaux leviers pour atteindre une autonomie élevée sont la diversité des prairies, le recours maximum au pâturage, la culture de mélanges céréales/protéagineux, et l'étalement des mises bas : celles-ci se font sur deux, voire quatre périodes de l'année (février, avril, septembre, novembre), ce qui permet de répartir les besoins alimentaires sur l'année. Notre stock de fourrages peut couvrir de 50 à 70% des besoins annuels. L'objectif actuel est d'identifier le taux de chargement qui permet d'acquérir une autonomie alimentaire très élevée sur le long terme ».

* Ingénieur dans l'Unité de Recherches sur les Herbivores, Inra de Clermont-Ferrand-Theix.

** Benoit *et al.* 2009. *Inra Prod. Anim.* 22 (3), 207-220.

plus de 50% autour de la moyenne en période de sécheresse. Chaque éleveur doit donc définir son niveau « d'auto - protection ». Pour les élevages à l'herbe, on estime qu'une demi-année de stock d'avance constitue une bonne sécurité. Des adaptations structurelles consistent à raisonner la charge des animaux, le choix des races, les dates des mises bas (voir encadré page VII).

Cultures : irrigation et assolement

D'après l'expertise collective, les principaux leviers à court terme en grandes cultures pour réagir à une situation de sécheresse sont l'ajustement de l'irrigation et de l'assolement, sous condition d'une anticipation suffisante. Ainsi, en 2005 et 2006, des alertes ministérielles précoces dès les mois de février-mars avaient permis de privilégier des espèces plus résistantes à la sécheresse, avec une augmentation de la sole de sorgho et de tournesol, et une diminution de la sole de maïs.

Cependant, alors que la fréquence des sécheresses risque d'augmenter, les adaptations d'assolement observées jusqu'à présent semblent essentiellement conjoncturelles et non durables : même s'il diminue, le maïs grain représente en surface le double de l'ensemble : sorgho + tournesol + soja. En 2011, la sole de sorgho grain a diminué de 13% par rapport à 2010 (4). Cette situation s'explique du fait que d'autres paramètres entrent en ligne de compte dans le choix des agriculteurs et peuvent freiner les évolutions. Paramètres techniques : défaut de productivité (tournesol), problèmes de désherbage (sorgho) ou paramètres économiques : évolutions des prix et des aides de la PAC (oléagineux), structuration des filières (sorgho). La solution passe par la diversification, qui donne à l'agriculteur une souplesse pour assurer sa production. Il s'agirait de combiner des systèmes de cultures pluviales et irriguées à l'échelle d'un bassin versant en fonction des ressources disponibles (cours d'eau et nappes). Un prérequis serait l'établissement d'une base de données indiquant les systèmes de culture viables dans chaque contexte pédoclimatique. Un dispositif lourd à mettre en place, mais qui permettrait des négociations entre acteurs pour la ressource eau à l'échelle du territoire (voir partie 3).



LE DISPOSITIF PÉPISTA mesure le diamètre des branches au 100e de mm près. Une contraction supérieure aux fluctuations normales jour-nuit indique que la plante manque d'eau et risque de puiser dans ses réserves, entre autres les fruits, qui vont arrêter de se développer.

Les arbres fruitiers protégés

Ces productions sont en général moins sensibles à la sécheresse que les cultures annuelles ou l'élevage, car les trois quarts des vergers sont irrigués en France. Il existe des appareils permettant de piloter l'irrigation très précisément selon les besoins de la plante. Un dispositif breveté dans les années 1980 par l'Inra d'Avignon, appelé Pépista, mesure les variations de diamètre des branches qui reflètent l'état d'hydratation des tissus : il y a contraction quand il y a perte d'eau (voir photo). Cet appareil est commercialisé par la société Agroressources, à Avignon, qui le loue à des producteurs pour une saison afin qu'ils « étalonnent » leurs vergers. C'est-à-dire qu'ils déterminent à quel état hydrique du sol (mesuré par un tensiomètre) correspond le début de stress hydrique chez l'arbre (mesuré par Pépista). Cela leur permettra par la suite de déclencher l'irrigation seulement en cas de besoin. On estime que ce dispositif permet des économies d'eau de 25 à 30%. Si les épisodes de sécheresse se multiplient, l'usage de ces méthodes fines de pilotage de l'irrigation pourrait se développer.

« Il nous faudrait des indicateurs des pratiques culturales »

Témoignage de Frédéric Levrault, chambre d'agriculture de Poitou-Charentes

« Quand il y a eu prise de conscience de la sécheresse, il était trop tard pour les cultures d'hiver, le blé tendre, le blé dur, l'orge, le triticale, les assolements étant déjà en place. En Poitou-Charentes, on estime que le rendement des céréales à paille a baissé en 2011 de 20 à 50% par rapport à la moyenne des dernières années. La seule adaptation possible était l'irrigation en fin de cycle - elle s'est pratiquée de fait à large échelle - mais ces prélèvements hypothéquaient les possibilités ultérieures d'irrigation des cultures de printemps. Même si le maïs a été semé plus tôt, les agriculteurs ont été amenés à demander par deux fois des dérogations pour pouvoir irriguer malgré les interdictions administratives. Finalement, la crise s'est estompée avec une centaine de mm d'eau tombée fin juillet. La sécheresse de cette année pose donc à nouveau la question des surfaces en maïs tenables en fonction des réserves d'eau disponibles ou éventuellement à construire. Le point de vue des agriculteurs irrigants a évolué au cours des dernières années car ceux-ci sont conscients de la situation : la sole de maïs a tendance à diminuer et il y a un avancement indéniable des dates des semis et un choix préférentiel de variétés plus précoces. Mais pour bien suivre ces évolutions, il nous faudrait des indicateurs géographiquement détaillés des pratiques culturales, des surfaces et des rendements pour chaque culture ».

(1) Départements des Deux-Sèvres, de la Vienne, de la Charente et de la Charente-Maritime.
(2) Départements de l'Indre, du Cher, de la Creuse et de la Haute-Vienne.
(3) UMR « Agrosystèmes, agricultures, gestion des ressources, innovations et ruralités », www.agir.toulouse.inra.fr/agir
(4) source : Agreste Conjoncture, septembre 2011.


© Inra / UMR LEPSE

LA PLATEFORME PhenoArch de l'Inra de Montpellier permet l'analyse phénotypique automatisée de 1 650 plantes. (Ici du maïs).

3 Les leviers à long terme

A l'avenir, l'agriculture devra produire plus dans un contexte de ressource en eau limitée. Pour relever ce défi, les scientifiques de l'Inra explorent toutes les échelles d'analyse, de l'amélioration variétale à la gestion territoriale de l'eau en passant par la conception de systèmes de culture innovants. La modélisation joue un rôle central pour gérer la complexité des différentes approches et trouver une cohérence globale. Quelques exemples de recherches.

Le levier le plus directement contrôlable pour les agriculteurs est le choix des variétés. C'est pourquoi la conception de variétés tolérantes au manque d'eau fait l'objet de nombreuses recherches à l'Inra. Cependant l'adaptation à la sécheresse met en œuvre des caractères complexes et interdépendants impliquant chacun de nombreux gènes. « *Il n'y a pas de bon ou de mauvais caractères pour la tolérance*, explique François Tardieu, directeur de recherche au LEPSE (1) et coordinateur du projet européen DROPS (voir encadré), *tout dépend du scénario climatique et des caractéristiques du sol, le gène miracle n'existe pas* ». Par exemple, l'augmentation du développement racinaire ne sera favorable que s'il permet à la plante d'accéder à des ressources supplémentaires. Si ce n'est pas le cas, le coût en carbone de ces racines peut pénaliser le rendement. Autre illustration, lors d'un stress hydrique modéré, le maintien de la croissance foliaire favorise la photosynthèse et par conséquent le rendement. Dans des conditions plus sèches, ce caractère, qui induit aussi une évapotranspiration élevée (voir partie 1), peut provoquer un épuisement plus rapide de l'eau dans les sols voire la mort des plantes. Comme le souligne le chercheur « *On ne pourra jamais obtenir des plantes qui maintiennent leur productivité sans un niveau élevé de transpiration, il faut donc trouver un compromis entre protection et productivité* ». Ainsi, l'amélioration génétique doit prendre en compte la réponse globale des plantes face au manque d'eau, et ce, pour chaque contexte pédoclimatique (dates, intensité et fréquence des sécheresses, sol plus ou moins profond...).

Génotypes virtuels, intérêt bien réel

Dans cette optique, les scientifiques du LEPSE ont développé une méthode qui permet de simuler le comportement de divers génotypes pour un grand nombre de scénarios climatiques. Elle a d'abord été appliquée à la croissance des feuilles ou des organes reproducteurs chez le maïs (voir dossier Biotechnologies vertes dans l'Inra Mag n°15). Les génotypes (l'ensemble des gènes) sont corrélés statistiquement aux phénotypes (expression des caractères) par l'observation d'un grand nombre de plantes, ce qui permet de révéler quelles régions du génome sont impliquées dans un caractère donné. Ces expérimentations, menées en conditions contrôlées, autorisent aussi l'analyse des effets des différentes versions des gènes (les allèles) sur le caractère correspondant en réponse à l'environnement. Grâce à la modélisation, il devient alors possible de déterminer quelles combinaisons d'allèles seraient les plus intéressantes dans une région donnée pour des scénarios climatiques actuels ou anticipés. Les chercheurs testent non seulement les combinaisons alléliques des génotypes existants, mais ils peuvent imaginer et tester des génotypes virtuels. Ces derniers serviront ensuite de guide pour les sélectionneurs.

Drops : vers des variétés tolérantes « sur mesure »

Dans le cadre du projet Européen Drops*, l'Inra et ses quinze partenaires publics et privés vont tester en vraie grandeur la démarche employée au LEPSE. Trois espèces bénéficiant à la fois d'un fort intérêt économique et d'une solide base de connaissance au niveau génétique sont concernées : le maïs, le blé tendre, le blé dur. En plus de la croissance des feuilles et des organes reproducteurs, le projet s'intéressera à d'autres mécanismes d'adaptation comme le taux d'avortement des grains, l'architecture du système racinaire et l'efficience d'utilisation de l'eau (rapport transpiration/biomasse produite). Le projet a pour objectif d'améliorer les capacités de phénotypage pour chacun de ces caractères mais aussi d'identifier les régions du génome qui les déterminent et les marqueurs génétiques permettant de connaître la composition allélique de chaque génotype. *In fine*, ces données seront intégrées dans des modèles de fonctionnement des cultures qui simuleront la réponse globale des plantes en fonction de leurs caractéristiques génétiques et du scenario climatique. Ces outils et méthodes permettront aux sélectionneurs de créer des variétés qui seront plus tolérantes au stress hydrique et/ou plus efficientes dans l'utilisation de l'eau tout en étant adaptées aux diverses conditions pédoclimatiques européennes de demain… ou d'après-demain.

* Drought tolerant yielding plant. www.drops-project.eu



© Inra / Léon-Louis Damour

DES RESTRICTIONS D'EAU plus sévères à l'avenir pourraient rendre intéressante la substitution du maïs par d'autres cultures comme le sorgho ou le tournesol.

Systèmes de culture : mieux vaut prévenir que guérir

Au-delà de la tolérance intrinsèque des plantes, c'est l'ensemble du système de culture qui doit être adapté à une disponibilité en eau incertaine. Devant cet aléa, l'objectif est d'optimiser la rentabilité sur plusieurs années, plutôt que de viser la performance annuelle. L'enjeu est de taille pour la recherche qui doit trouver des stratégies cohérentes en jouant simultanément sur de multiples leviers interdépendants : assolements, variétés et conduites culturales. Stratégies qui doivent par ailleurs prendre en compte d'autres contraintes, telles que la réduction de l'utilisation des pesticides.

Tout d'abord, les assolements peuvent être raisonnés en introduisant des espèces plus tolérantes, moins gourmandes en eau ou dont les besoins interviennent en dehors de l'été. C'est ainsi qu'une étude menée en 2006 par Arvalis-Institut du végétal en Poitou-Charentes a analysé les meilleurs assolements à mettre en place dans le cas d'une réduction de 15 à 30 % des quotas d'irrigation. Il apparaît que la substitution du maïs par le sorgho, le tournesol ou les céréales à paille n'est intéressante que pour les exploitations ayant un faible quota initial. Avec un quota plus élevé, c'est le maïs, conduit en rationnant l'eau, qui reste avantageux. Si les restrictions sont plus fré-

quentes, la part des cultures irriguées au printemps doit augmenter. Cette étude a utilisé un logiciel développé par l'Inra et Arvalis-Institut du végétal. Baptisé LORA, il se base sur le taux de satisfaction des besoins en eau des plantes pour calculer la marge économique de l'exploitation en fonction des possibilités d'irrigation et de la main-d'œuvre. A l'avenir les chercheurs espèrent préciser la relation eau-rendement du logiciel et étendre ses possibilités à la sole non irriguée.

Règles de bonne conduite… des cultures

Le raisonnement conjoint du choix variétal et de la conduite de culture en fonction de la disponibilité en eau est également une voie prometteuse d'amélioration. On peut en effet envisager deux stratégies d'adaptation qui font appel à des variétés aux caractéristiques différentes combinées à des conduites adaptées. La première, l'esquive, consiste à décaler les stades les plus sensibles du développement de la plante (souvent la floraison) en dehors des périodes de stress hydrique les plus probables. On utilise alors des variétés à cycle court et/ou aptes à être semées plus tôt. Cette stratégie a néanmoins un coût : en réduisant la durée du cycle, on pénalise le rayonnement intercepté, donc le rendement accessible les bonnes années. Autre stratégie : le rationnement. Il s'agit de réduire soit la transpiration des plantes soit l'évaporation du sol pendant la première partie du cycle afin de conserver de l'eau pour la phase de remplissage des grains. Deux types de variétés et de conduites permettent d'atteindre cet objectif. Une variété à fermeture rapide des stomates ou à indice foliaire modéré peut être conduite avec une faible densité de peuplement et une fertilisation azotée réduite pour limiter la transpiration. A l'opposé, on peut rechercher à « couvrir » rapidement le sol pour en limiter l'évaporation. Une variété précoce conduite avec une plus forte densité de semis et une fertilisation suffisante sera alors plus adéquate.

Pour jongler avec tous ces paramètres afin de raisonner stratégie et variété en fonction des scénarios de sécheresse, les chercheurs ont mis au point des modèles dynamiques qui « miment » le fonctionnement des plantes en fonction de leurs caractéristiques et de leur environnement (climat, sol, conduite). Ainsi, le modèle SUNFLO, développé pour le tournesol par les chercheurs de l'UMR AGIR, permet de combiner plusieurs caractères phénologiques (durée de la phase post-floraison), morphologiques (surface foliaire) et physiologiques (vitesse de fermeture stomatique…) afin de les tester sur le long terme dans des conditions pédoclimatiques variées. Le modèle prend en compte les caractéristiques de chaque variété à partir de données de phénotypage mésurées au champ et en serre. Les scientifiques ont ainsi mis en lumière l'importance d'une fermeture précoce des stomates dans des milieux où la contrainte hydrique est précoce et prolongée. A l'inverse, en milieu plus favorable, il conviendra de favoriser l'interception du rayonnement et donc la photosynthèse. Outre la définition d'un mode d'emploi pour les variétés, cet outil devrait permettre d'améliorer les performances du système d'évaluation variétale. Des expérimentations virtuelles venant compléter les traditionnels essais multilocaux et pluri-annuels permettront d'élargir les situations pédoclimatiques étudiées. Pour plus de précision, les chercheurs travaillent actuellement à intégrer les liens entre pratiques culturales et développement d'une maladie du tournesol, le phoma, responsable de pertes de rendement aggravées en conditions sèches.



LES CHERCHEURS MODÉLISENT les caractéristiques des variétés de tournesol pour déterminer les meilleures stratégies de culture face à divers scénarios de sécheresse.

La gestion spatiale de l'eau, nouveau territoire de recherche

La raréfaction de la ressource en eau, tout comme la dégradation de sa qualité, fait apparaître des problèmes qui vont bien au-delà des échelles de la plante, de la parcelle ou de l'exploitation. Il s'agit des conflits d'usages à l'échelle des territoires. En tant que consommateur de la ressource, l'agriculture se retrouve en concurrence avec les usages domestiques (eau potable) et industriels mais aussi environnementaux. L'Inra s'attache depuis plusieurs années à prendre en compte cette nouvelle échelle d'analyse qui sert de support à de nombreuses politiques publiques (aménagement du territoire, développement écono-

mique, protection de l'environnement...). En effet, pour l'eau comme pour la forêt ou la biodiversité, la gestion des ressources naturelles sur le long terme ne peut se dissocier de celle du territoire. La gestion de l'eau est ainsi passée peu à peu d'une logique de gestion des flux pour chaque usage à une gestion spatiale et intégrée. La directive cadre sur l'eau (2) témoigne d'ailleurs de cette tendance en imposant des préconisations à l'échelle du bassin versant telles que la lutte contre l'imperméabilisation des sols ou la préservation des champs d'expansion de crue. Pour les gestionnaires de l'eau, répondre à ces exigences revient donc à influencer les divers modes d'occupation des sols au travers de politiques publiques (création de barrages, tarification, mesure incitative ou réglementaire). Dans une perspective de développement durable du territoire, les évolutions envisagées doivent tenir compte de critères économiques, sociaux et environnementaux.

Afin d'assister les gestionnaires de l'eau dans leur choix, des chercheurs des UMR AGIR et LERNA du centre Inra de Toulouse ont développé un modèle multicritère et multi-usage. Ce dernier simule la demande en eau et les profits liés à chaque usage. L'activité agricole y est plus particulièrement détaillée grâce à un modèle mécaniste qui prend en compte la croissance des cultures et leur besoin d'irrigation. En parallèle, un modèle hydraulique permet de quantifier l'offre en eau en tout point du réseau hydrographique. Le modèle générique ainsi obtenu a été appliqué à un bassin versant du Sud-Ouest, le système Neste, dans lequel l'irrigation des cultures pose un problème de pénurie d'eau en période d'étiage. Il permet par exemple de tester quelles pourraient être les allocations optimales en fonction de l'évolution de paramètres climatiques, économiques, agronomiques ou réglementaires. Puis de tester les politiques publiques adaptées pour se rapprocher de cet objectif. Ce modèle a été déjà utilisé pour explorer des systèmes de tarification innovants pour l'eau d'irrigation.



BARRAGE DE GABAS dans les Pyrénées. Doit-on modifier les systèmes de cultures ou augmenter la ressource en eau ? L'Inra apporte des outils pour éclairer le débat.

Créer les conditions du dialogue

Toujours pour le système Neste, les chercheurs de l'UMR AGIR ont développé un outil original destiné aux différents acteurs ou porteurs d'enjeux. Il leur permet de construire et d'évaluer des scénarios de distribution des systèmes de culture sur le territoire. En effet, la planification de la gestion de l'eau fait souvent appel à des instances de concertation ou des débats publics dans lesquels divers acteurs proposent leur vision de l'aménagement du territoire, y compris des systèmes de culture. Pour que ces points de vue soient mieux pris en compte par des gestionnaires comme les agences de l'eau, il est important de les préciser et d'évaluer leurs conséquences. « *Cette nécessité est apparue lors du débat public sur la construction du barrage de Charlas*, raconte Delphine Leenhardt, chercheuse à l'UMR AGIR, *un collectif d'opposants au projet proposait une nette diminution des surfaces irriguées de maïs, mais sans préciser à quels endroits les remplacer et par quelles cultures. Ce qui peut affaiblir la pertinence de la proposition* ». Le modèle décrit très finement la répartition actuelle des systèmes de culture mais aussi le déterminisme de leur localisation (nature et pente des sols, taille de l'exploitation, orientation technique, climat...). Un des défis de la méthode résidait dans la conversion de discours qualitatifs en éléments d'entrée du modèle. Une interface originale a été conçue pour aider à préciser puis quantifier ce type de propositions et prendre ainsi plus de types d'acteurs en compte. Basées sur un modèle bio-décisionnel, les simulations permettent ensuite de délivrer des indicateurs tels que la demande en eau d'irrigation ou le rendement économique des cultures.

(1) Laboratoire d'écophysiologie des plantes sous stress environnementaux, Inra de Montpellier.

(2) Directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

Dossier rédigé par **Géraud Chabriat** et **Pascale Mollier**
Responsables scientifiques : **Christian Huyghe** et **Jean-François Soussana**

+d'infos

web :
Le dossier Web : www.inra.fr/la_science_et_vous/secheresse_et_agriculture
Le dossier du Ciag « Productions végétales et sécheresse » : www.inra.fr/ciag/revue/volume_2_juin_2008